Elektrische lading

Als er geen elektrische lading zou bestaan, dan zouden u en ik niet in ons heelal aanwezig zijn, want dan zou er geen heelal bestaan. Afgezien van dat simpele feit is elektrische lading een grondbeginsel van de elektronica. Een kennismaking met een tamelijk ongrijpbaar verschijnsel.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 02-10-2017

Wat is elektrische lading?

Niemand die het écht weet
Een zeer fundamentele vraag, waarop helaas geen antwoord mogelijk is! Wat lading écht is, weet de wetenschap ook nu nog steeds niet. Natuurkundigen stellen vast dat het een fundamentele eigenschap van de natuur is en dat sommige bouwstenen van de materie, zoals elektronen en protonen, die eigenschap bezitten. Andere fundamentele bouwstenen, zoals neutronen, hebben die eigenschap niet. Net zo min kan men verklaren waarom er twee soorten ladingen bestaan. Tot nu toe kan het enige antwoord op deze vraag luiden *'omdat anders het heelal niet het heelal zou zijn en er geen mensen zouden zijn om de schoonheid van dat heelal waar te nemen'.*

Antropisch principe
Als u dit een beetje flauw vindt, zult u verbaasd zijn als u verneemt dat deze redenering is uitgegroeid tot een basisprincipe van sommige moderne wetenschappers, het zogenoemde *'antropisch principe'*. Alle fundamentele eigenschappen van de materie die niet verklaard kunnen worden, worden aan deze kapstok opgehangen. Gelukkig zijn er ook serieuze wetenschappers, die het antropisch principe als onwetenschappelijk terzijde schuiven en echt op zoek zijn naar het antwoord op dergelijke fundamentele vragen.

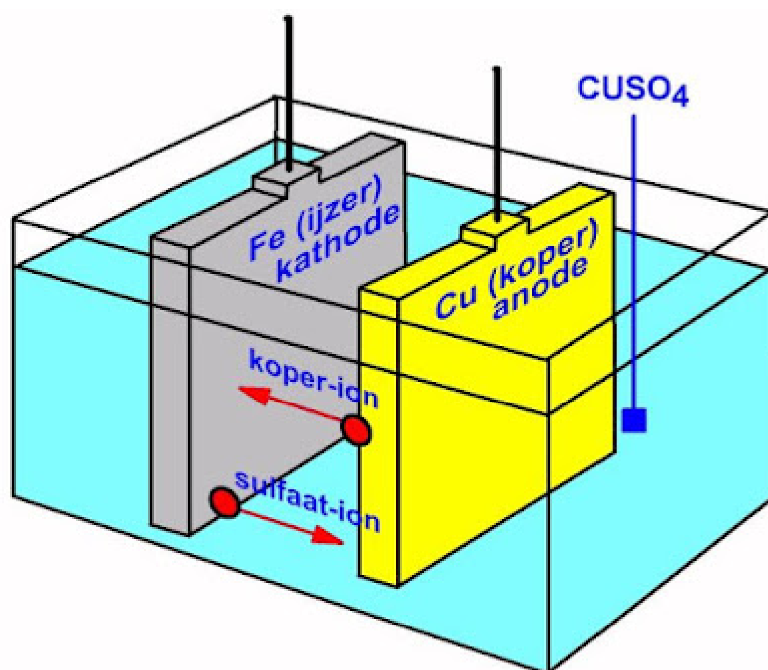
Benjamin Franklin
Hoe dan ook, elektrische lading bestaat en het was de Amerikaan Benjamin Franklin die in het jaar 1747 het begrip *'elektrische lading'* en de deelbegrippen *'positief'* en *'negatief'* invoerde. Tegengestelde elektrische ladingen trekken elkaar aan, gelijke ladingen stoten elkaar af.

Symbool en eenheid van elektrische lading
Het symbool van elektrische lading, de afkorting die in wiskundige formules wordt gebruikt voor het aanduiden van deze lading, is Q. De eenheid van lading is de coulomb, afgekort tot C. Deze naam werd gekozen ter ere van de wetenschapper Charles Coulomb, die in het jaar 1788 zijn wet van Coulomb opstelde, waarmee de aantrekkingskracht die twee ladingen op elkaar uitoefenen wiskundig werd beschreven.
De coulomb is geen fundamentele grootheid en kan in het MKS-stelsel ook worden uitgedrukt als As, ampère maal seconde. De relatie is eenvoudig:
1 C = 1 As.

De definitie van de Coulomb
Uiteraard moet exact worden gedefinieerd hoe groot 1 C is, of met andere woorden, met hoeveel lading de eenheid overeen komt. Deze definitie werd lang geleden vastgesteld en

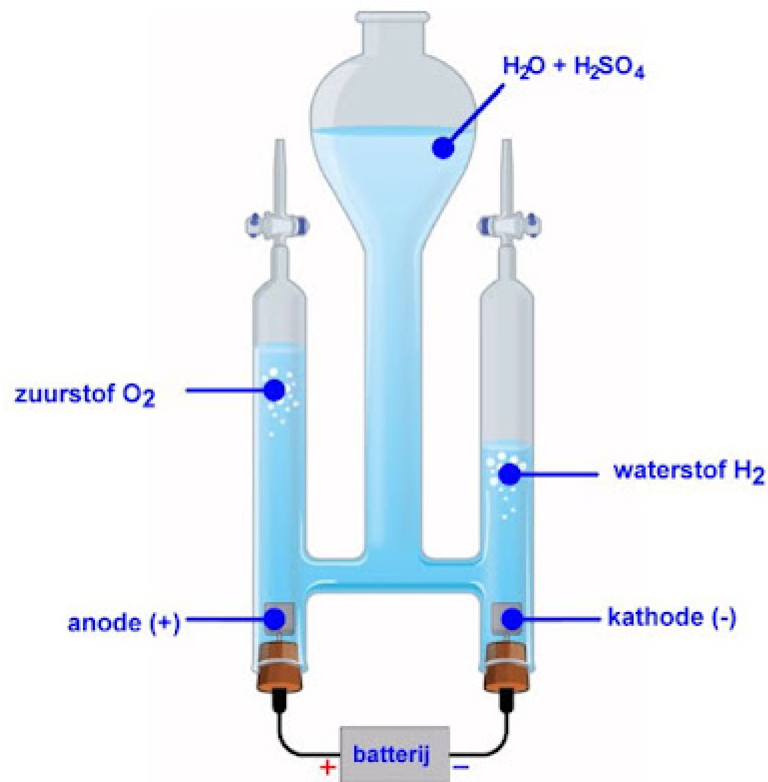
wel met behulp van de elektrochemie. Er zijn in de loop der tijden twee verschillende definities van de eenheid Coulomb in zwang gekomen.

Koperneerslag
Stel, zoals voorgesteld in onderstaande figuur, dat u een glazen bak vult met in water opgelost kopersulfaat $CuSO_4$. In de vloeistof hangt u twee metalen platen, een van koper (Cu) en een van ijzer (Fe). Als u beide platen verbindt met een spanningsbron zal er door de geleidende vloeistof een elektrische stroom vloeien. Deze stroom bestaat uiteraard uit vrije elektronen die een bepaalde negatieve lading vertegenwoordigen. Die vrije elektronen, die zich door de vloeistof spoeden, zullen bepaalde interacties aangaan met de kopersulfaat atomen in de vloeistof. Het gevolg hiervan is dat zich op de ijzeren plaat een dun laagje koper afzet. De hoeveelheid koper die op het ijzer terecht komt wordt gebruikt voor het definiëren van de eenheid coulomb. Eén coulomb is de hoeveelheid lading die in een kopersulfaat oplossing 0,328 mg koper afscheidt.



Het definiëren van de coulomb door het elektrolyseren van kopersulfaat.
(© 2017 Jos Verstraten)

Waterstof vrijgave
In een zogenoemde voltameter, een glazen apparaat bestaande uit drie holle buizen dat met aangezuurd water wordt gevuld, zitten in de twee buitenste buizen elektroden. De twee kraantjes, aan de bovenzijde van de buitenste buizen, kunnen worden geopend zodat deze buizen zich volledig met water vullen. Nadien sluit u de kraantjes. Als u tussen de elektroden een gelijkspanning legt zult u vaststellen dat er een stroom door het water gaat vloeien. Die stroom bestaat natuurlijk weer uit vrije elektronen, die elektrochemische reacties aangaan met de watermoleculen H_2O. U stelt vast dat in de buis die met de positieve pool van de batterij is verbonden zuurstofgas belletjes rond de elektrode ontstaan. In de tweede buis, verbonden met de negatieve pool, ontstaan waterstofgas belletjes rond de elektrode. Als de gasbelletjes groot genoeg zijn stijgen zij op en verdringen het water. Na enige tijd stelt u vast dat er heel precies twee keer meer waterstofgas H_2 wordt gevormd dan zuurstofgas O_2. Aan de hand van deze waarnemingen heeft men de grootte van één Coulomb bepaald als de hoeveelheid lading, die noodzakelijk is om 0,0104 mg waterstofgas te laten ontstaan. Omdat men het volume van de buis weet en het soortgelijk gewicht van waterstof kan men het gewicht bepalen aan de hand van de lengte van de waterstofgas kolom in de buis.



Een tweede manier waarop men de coulomb heeft gedefinieerd.
(© Wikimedia Commons)

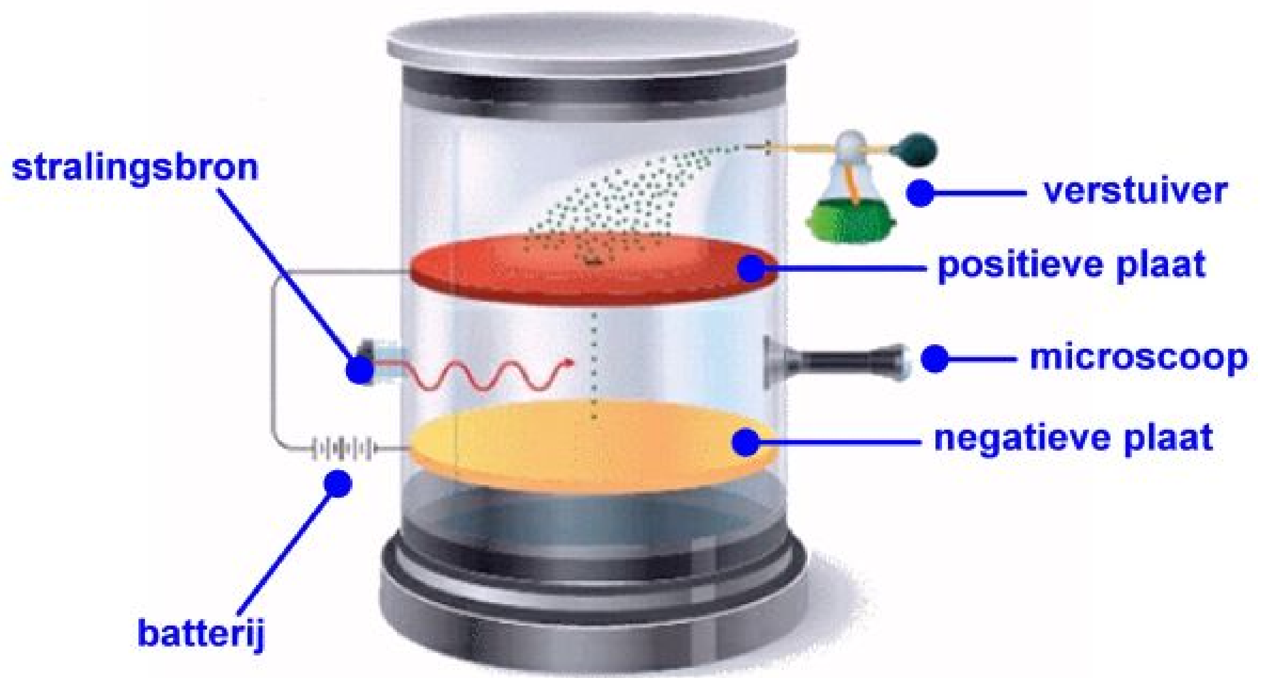
De moderne definitie van de coulomb
Een coulomb is gelijk aan de elektrische lading in 6,241.506 • 10^{18} protonen.

Een coulomb is een heleboel lading
Een elektrische lading gelijk aan 1 C is een immense hoeveelheid lading. Als bijvoorbeeld twee puntladingen die respectievelijk +1 C en -1 C groot zijn op een onderlinge afstand van een meter zouden worden geplaatst, dan zouden deze twee ladingen elkaar aantrekken met een kracht van ongeveer een miljoen Newton. In de praktijk zal dus steeds gewerkt worden met mC en zelfs µC.

De fundamentele lading
Volgens de klassieke mechanica zijn het elektron en het proton de fundamentele bouwstenen van de materie, dat wil zeggen dat zij niet verder gedeeld kunnen worden. De quantummechanica heeft geleerd dat dit absoluut niet het geval is, maar voor het beschrijven van fundamentele elektrische en chemische verschijnselen doet dat niets ter zake. Nu hebben elektronen en protonen lading en het ligt dus voor de hand om in de klassieke mechanica aan te nemen dat de lading van een elektron en een proton de meest fundamentele lading is die bestaat. De vraag is dan natuurlijk hoe groot deze lading is. De wetenschapper Millikan slaagde er in deze lading te meten en stelde vast dat de fundamentele lading gelijk is aan 1,602 214 • 10^{-19} C. Dit wil dus zeggen dat er ergens een lading van 1 C aanwezig is als er op die plaats niet minder dan 6.241.506.000.000.000.000 elektronen te veel of te weinig zijn! De fundamentele lading van een elektron wordt voorgesteld door het symbool -e.

De proef van Millikan
De proef van Millikan staat bekend in de historie van de wetenschap als een klassiek voorbeeld van goede experimentele natuurkunde. De meeste onderzoekers zouden immers onmiddellijk veronderstellen dat het onmogelijk is om zoiets kleins als de fundamentele lading van een elektron te meten en niet eens gaan nadenken over een methode om deze grootheid te meten. Millikan deed dat wél en bedacht een systeem waarmee het, via allerlei omwegen, toch mogelijk bleek het onmeetbare te meten. Aan de hand van onderstaande figuur wordt in het kort uitgelegd hoe Millikan te werk ging. In een vat wordt via een verstuiver olie verstoven

tot fijne druppeltjes. Deze druppeltjes vallen uiteraard door hun gewicht naar beneden. Sommige druppeltjes kunnen via een klein gaatje tot het onderste compartiment van het vat doordringen. Dat is opgebouwd uit twee metalen platen, die verbonden worden met een regelbare gelijkspanning van een batterij. De oliedruppeltjes die tussen de platen komen zullen nog steeds, als gevolg van hun gewicht en de aantrekkingskracht van de aarde, naar de onderste plaat willen vallen. De ruimte tussen de platen wordt bestraald met een sterke bundel röntgenstraling. Deze stralen zullen de luchtatomen tussen de platen in stukken scheuren, waardoor vrije elektronen en positieve ionen ontstaan. De vrije elektronen kunnen zich nu binden aan de oliedruppeltjes. Als een oliedruppeltje een vrij elektron bindt, dan krijgt het een negatieve lading, die uiteraard gelijk is aan de lading van het elektron. Het gevolg is dat het negatief geladen druppeltje wordt aangetrokken door de positieve bovenste plaat.



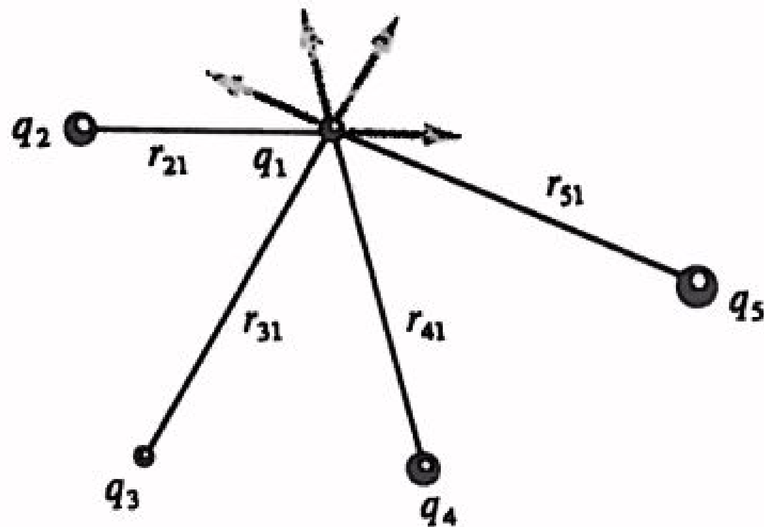
Een schets van de opstelling van Milllikan. (© Akron Physics Club)

Er werken nu twee tegengestelde krachten in op het geladen druppeltje. Op de eerste plaats de aantrekkingskracht van de aarde, op de tweede plaats de coulomb-kracht. De spanning tussen de twee platen kan nu zo geregeld worden dat beide krachten even groot zijn en dat de geladen oliedruppeltjes blijven zweven tussen de platen. Dit kan met een microscoop worden waargenomen. Met deze microscoop kan ook de diameter van de druppeltjes worden gemeten. Hieruit kan men het volume berekenen en omdat het soortgelijk gewicht van de olie bekend is, kan men dus het gewicht van een druppeltje bepalen. Uit dit gewicht kan men weer de grootte van de aantrekkingskracht berekenen, die op de druppel wordt uitgeoefend door de aarde. De formule hiervoor werd door Newton opgesteld. Deze kracht is gelijk aan de kracht die door het elektrisch veld tussen de platen wordt uitgeoefend op de geladen druppel. Uit de wet van Coulomb kan men hieruit afleiden hoe groot de lading van de druppel is. Uiteraard heeft Millikan (en zijn assistenten) dit niet voor één druppeltje gemeten en berekend, maar voor duizenden. Aan de hand van statistische berekeningen kan men dan een gemiddelde waarde berekenen voor de lading van het elektron. Millikan heeft voor dit zeer ingenieus bedachte experiment in 1923 de Nobelprijs voor natuurkunde gekregen.

De eerste wet van Coulomb

Met een uiterst gevoelige torsie-balans was Charles Coulomb in staat een formule op te stellen die de kracht gaf die twee elektrische puntladingen op elkaar uitoefenen. De kracht is recht evenredig met het product van de ladingen en omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand tussen de ladingen. Dat was uiterst interessant, want die wet lijkt als twee druppels water op de wet van Newton, die de aantrekkingskracht tussen twee massa's beschrijft. Let wel dat het begrip puntlading hierbij van fundamenteel belang is. De wet van

Coulomb geldt inderdaad alleen als de twee geladen voorwerpen minimale afmetingen hebben en als deze zich in een ruimte bevinden die volmaakt vacuüm (luchtledig) gezogen is. De eerste wet van Coulomb wordt wiskundig in zijn meest algemene vorm gegeven door de uitdrukking die hier is samengevat.



$$F = K_e \frac{q_1 q_2}{r_{21}^2} + K_e \frac{q_1 q_3}{r_{31}^2} + K_e \frac{q_1 q_4}{r_{41}^2} + K_e \frac{q_1 q_5}{r_{51}^2}$$

De meest algemene wiskundige uitdrukking van de eerste wet van Coulomb.
(© Akron Physics Club)

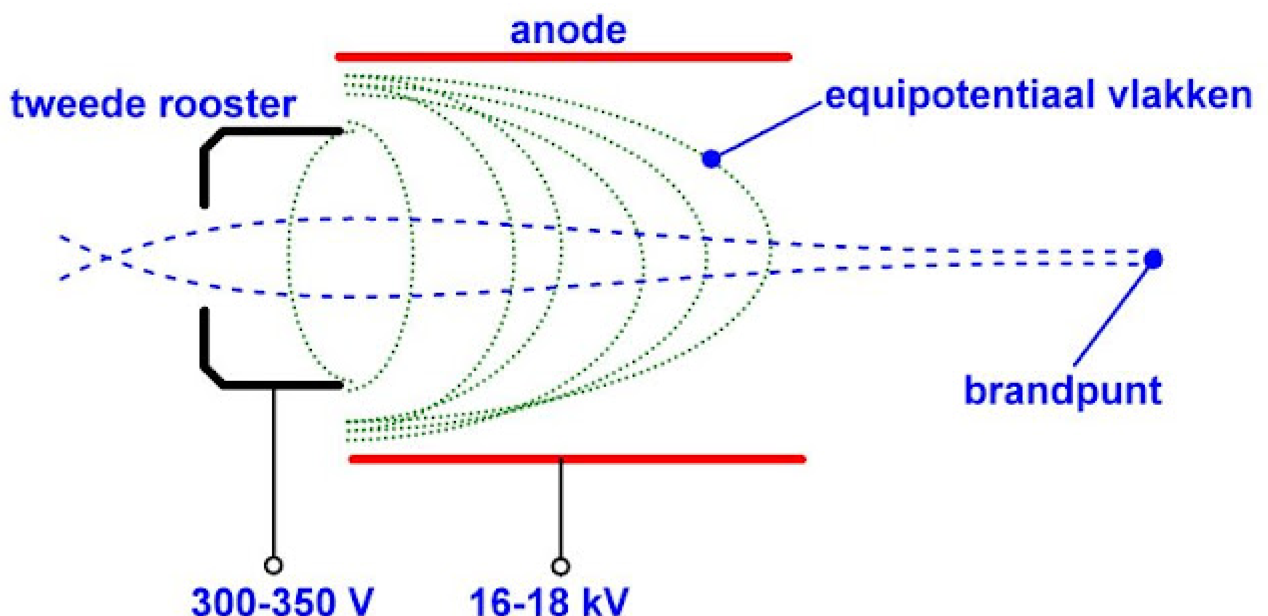
Puntlading q_1 is positief en is omgeven door vier positieve puntladingen q_2 tot en met q_5. Tussen q_1 en de vier overige ladingen treden nu vier afstotende krachten op, die elkaar niet beïnvloeden, zodat de uitgeoefende krachten simpelweg vectoriëel bij elkaar opgeteld kunnen worden om de totale kracht te berekenen. Elk ladingspaar gedraagt zich alsof de andere ladingen niet aanwezig zijn. Dit komt tot uiting in de wiskundige uitdrukking, die in dezelfde figuur voorgesteld. Uit deze figuur blijkt duidelijk dat de krachten inwerken in de richting van de verbindings-as tussen de puntladingen. De kracht F, opgewekt als gevolg van de aantrekking of afstoting van elektrische puntladingen, wordt de coulomb-kracht genoemd.

De elektrische constante K_e
In de formule van Coulomb moest een bepaalde constante factor K_e opgenomen worden om de formule in overeenstemming te brengen met de experimenteel gemeten krachten. Deze constante noemt men de elektrische constante en heeft een waarde die gelijk is aan:
$K_e = 8{,}98742 \cdot 10^9\ Nm^2/C^2$
Deze fundamentele natuurconstante wordt ook wel eens de constante van Coulomb genoemd. Als u zich afvraagt waar die absurde eenheid van Nm^2/C^2 vandaan komt, hoeft u niet lang naar een antwoord te zoeken. In een wiskundige formule moet er, links en rechts van het gelijkheidsteken, steeds dezelfde eenheid gevonden worden. Anders vergelijkt men immers appels met peren, want een wiskundige uitdrukking als 5 meter = 10 seconde is natuurlijk onzinnig. Links staat de eenheid van kracht, de Newton N ofwel kgm/s^2. Dus moet ook rechts dezelfde eenheid worden aangetroffen. Het zal duidelijk zijn dat dit alleen het geval is als men aan de constante van Coulomb de eenheid Nm^2/C^2 toekent. De factoren m^2 en $1/C^2$ zijn immers aanwezig in teller en noemer van de formule en kunnen dus geschrapt worden. Het enige dat overblijft is N. Misschien allemaal een beetje vreemd, maar wiskunde werkt nu eenmaal zo!

Het belang van de coulomb-kracht in de natuurkunde
De wet van Coulomb beschrijft een van de meest fundamentele krachten die in de natuur bestaan. Op zeer grote schaal bepaalt de zwaartekracht de samenstelling van het heelal. Op

zeer kleine schaal zijn het de zwakke en sterke kernkrachten die het gedrag van fundamentele atoomdeeltjes vastleggen. Alles dat daartussen zit wordt bestuurd door de coulomb-kracht.
Daarnaast heeft deze kracht tal van praktische toepassingen. Elektronen werden in de beeldbuis van een analoge oscilloscoop afgebogen, doordat er coulomb-krachten op inwerken. De elektronenspot die het scherm van een antiek beeldbuis raakte is niet groter dan een punt, doordat de elektronenstraal door middel van coulomb-lenzen op het scherm gefocusseerd werd. Elektronen worden in deeltjesversnellers tot grote snelheden versneld doordat zij onderworpen worden aan diverse coulomb-krachten. Coulomb-krachten zorgen ervoor dat stofdeeltjes uit de rookgassen van een oven worden verwijderd. In verfspuiterijen wordt er heel wat verf bespaard doordat de vernevelde verfdeeltjes elektrisch worden opgeladen en nadien massaal terecht komen op het te bespuiten voorwerp.

Een praktische toepassing
Als praktische toepassing van de coulomb-kracht wordt de elektrostatische lens besproken. Deze wordt gebruikt om een straal elektronen te bundelen. In onderstaande figuur is het principe van een dergelijke lens getekend, zoals deze werd aangetroffen in de beeldbuis van een analoge TV. De elektronenstraal wordt gegenereerd door een kathode-materiaal op te warmen dat gemakkelijk elektronen uitzendt. De uitgezonden elektronen worden aangetrokken door de anode (het scherm van de beeldbuis), die op een grote positieve spanning staat. Er is daar dus veel lading aanwezig. Zonder speciale maatregelen zouden de elektronen in de elektronenstraal echter zeer snel uit elkaar waaieren. De elektronen zijn immers allemaal negatief geladen en stoten elkaar af. Er zou geen sprake zijn van een scherpe lichtspot op het scherm. Tussen de kathode en de anode wordt een elektrostatische of coulomb-lens geplaatst. Deze bestaat uit een rooster g_2, dat op een positieve spanning van enige honderden volt wordt aangesloten. Tussen dit rooster en de anode ontstaat een ladingsverschil, met als gevolg dat er in de ruimte een elektrostatisch veld van een speciale vorm ontstaat. De elektronen worden door dit veld afgebogen, natuurlijk door de coulomb-krachten, en wel zo dat het brandpunt van de elektronenstraal precies op het scherm van de beeldbuis ligt. Op deze manier kan men elektronenbundels dus net zo focusseren als lichtstralen met optische lenzen.

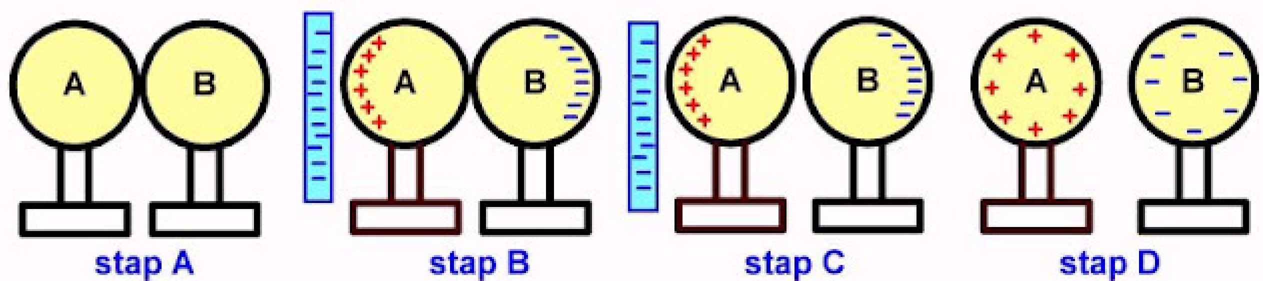


Het principe van een elektrostatische lens. (© 2017 Jos Verstraten)

Eigenschappen van elektrische lading

Ladingsinductie

Ladingen kunnen van het ene naar het andere voorwerp worden overgebracht, zonder dat er sprake is van een rechtstreeks geleidende verbinding tussen de voorwerpen. Dergelijke verschijnselen zijn niet alleen theoretisch van belang, maar spelen bijvoorbeeld een grote rol bij het begrijpen van de werking van een FET. Ook daar is sprake van ladingsinductie in de sperlaag tussen de gate en de rest van de halfgeleider. Het principe van ladingsinductie wordt toegelicht aan de hand van onderstaande figuur.
U monteert twee koperen bollen A en B op isolatoren en brengt deze met elkaar in contact. Zij vormen dan één geleidend voorwerp in rust en er is geen sprake van een ladingsverdeling. Nu brengt u een negatief geladen staaf, bijvoorbeeld eboniet dat u flink hebt gewreven met een doek, in de buurt van bol A. De vrije elektronen in het koper van bol A zullen door deze negatieve lading worden afgestoten en vluchten naar bol B. In bol A blijven koperatomen over met een tekort aan elektronen.



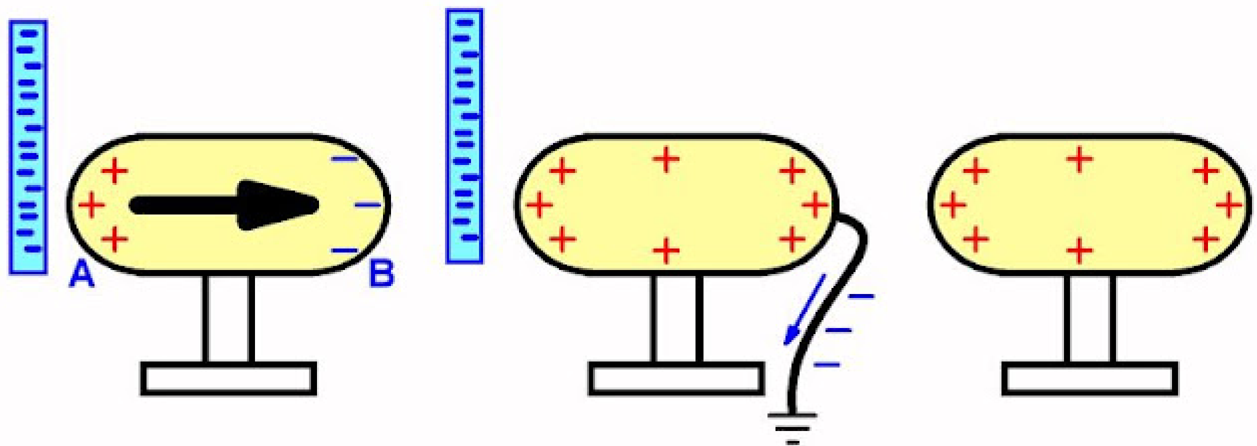
Het algemene principe van ladingsinductie. (© 2017 Jos Verstraten)

Deze onvolledige atomen noemt men ionen en het zal duidelijk zijn dat deze positief geladen zijn. Het gevolg hiervan is dat het ladingsevenwicht wordt verbroken en dat de linker rand van bol A positief oplaadt en de rechter rand van bol B negatief. Vervolgens verplaatst u bol B een beetje naar rechts, zodat het elektrisch contact tussen beide bollen verbroken wordt. U stelt vast dat de ladingsverdeling in beide bollen niet verandert. Trekt u tot slot de ebonieten staaf weg, dan kunt u met behulp van een zeer gevoelige ladingsmeter vaststellen dat bol A een positieve lading heeft en bol B een negatieve lading. De ladingen zijn keurig over het oppervlak van de bollen verdeeld.

Verklaring van het verschijnsel
Dit vreemde verschijnsel kan gemakkelijk verklaard worden uit het atoommodel van Rutherford. Een geleider zoals koper heeft veel zeer los gebonden elektronen op de buitenste schil. Deze worden door de sterke negatieve lading van de staaf uit de koperatomen bevrijd. De nu vrije elektronen kunnen gemakkelijk door het koper van atoom naar atoom springen en migreren door de afstotende kracht van de staaf zo ver mogelijk uit de buurt, dus naar de rechter zijde van bol B. In bol A blijft een aantal atomen achter, dat elektronen mist. Deze atomen worden dan positieve ionen en deze worden door de negatieve lading van de staaf aangetrokken. Op het moment dat het contact tussen beide bollen verbroken wordt kunnen de vrije elektronen nooit meer terug keren naar hun atomen. Vandaar dat bol B achter blijft met een teveel aan vrije elektronen en bol A met een teveel aan positieve ionen.

Ladingsaccumulatie
Een ander vreemd verschijnsel van elektrische lading is de zogenoemde ladingsaccumulatie. Dit verschijnsel is een rechtstreeks gevolg van de ladingsinductie en kan worden gebruikt om een voorwerp heel sterk positief of negatief op te laden. Het principe is getekend in onderstaande figuur. Stel dat het de bedoeling is een metalen cilinder positief te laden. U moet dan in eerste instantie een negatief geladen voorwerp, zoals een staaf, in de buurt van de cilinder houden. Door ladingsinductie zal de linker helft A van de cilinder positief geladen worden en de rechter helft B negatief. Die negatieve lading kan nu afgevoerd worden door de rechter helft van de cilinder even door middel van een draadje te verbinden met de aarde. De vrije elektronen vloeien dan af naar de aarde, die elektrisch neutraal is. Nadat de verbinding is verbroken en de staaf verwijderd, zal de positieve lading zich over de cilinder verspreiden. Nadien kunt u het proces herhalen, waardoor weer vrije elektronen worden afgevoerd naar de massa en er dus nog meer positieve ionen in de cilinder achter blijven. Op deze manier kunt

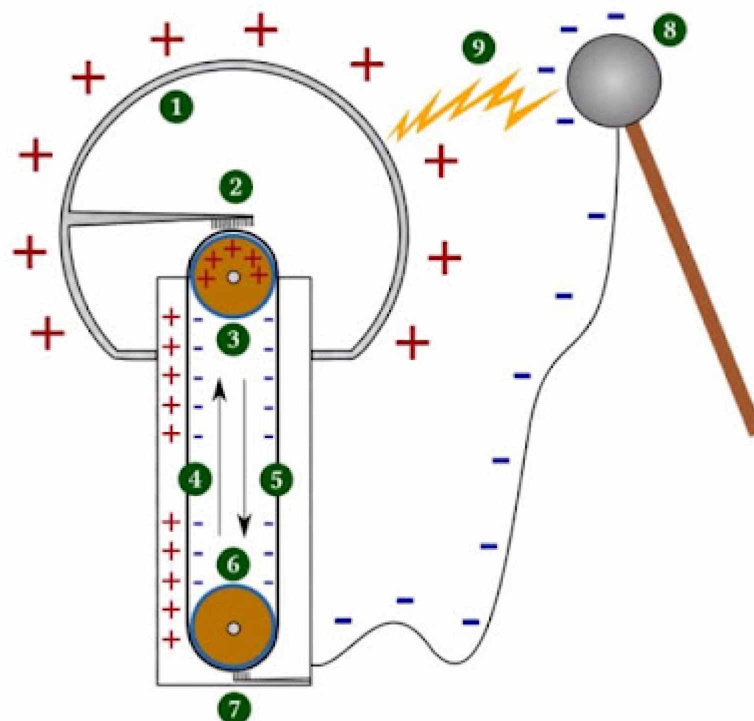
u de positieve lading in de cilinder stap na stap opvoeren.



Het principe van ladingsaccumulatie. (© 2017 Jos Verstraten)

Elektriseermachines

Het principe van ladingsaccumulatie wordt gebruikt in de zogenoemde elektriseermachines, zoals de Van de Graaf generator. De ladingen die met dergelijke apparaten verzameld kunnen worden zijn zo groot dat u er decimeter lange vonken mee kunt trekken. In onderstaande figuur wordt een indruk gegeven van de praktische uitvoering van een dergelijk apparaat. Een isolerende riem [4-5] wordt door middel van twee poelies [3-6] aangedreven. Door de wrijving ontstaat statische lading op de riem. De negatieve lading wordt door een koperen borstel [7] aan de onderzijde afgevoerd naar de aarde. De positieve lading wordt door een tweede koperen borstel [2] aan de bovenzijde afgevoerd en opgeslagen op een grote koperen bol [1]. Met een kleinere koperen bol [8], die elektrisch met de aarde is verbonden, kunt u na een bepaalde tijd de lading op de grote bol afvoeren. Dat verschijnsel gaat geaard met vonken [9] die wel twintig centimeter lang kunnen zijn.



Een inkijkje in een Van de Graaf generator. (© Wikimedia Commons)

Elektrische winden

Grote ladingen zijn in staat vreemdsoortige verschijnselen te veroorzaken. Een van de meest intrigerende is de elektrische wind. Stel dat u een elektrische geleider verbindt met het sterk positief geladen oppervlak van een Van de Graaf generator. De geleider is voorzien van een scherpe punt. Als u nu deze punt in de buurt van een kaarsvlam houdt zult u vaststellen dat

de vlam van de kaars opzij wordt geblazen. Het is zelfs mogelijk dat de vlam wordt uitgeblazen! Blijkbaar wekt de sterk positief geladen naaldpunt een flinke luchtverplaatsing op.



Een experiment waarmee u het waaien van de elektrische wind kunt aantonen.
(© Bernard Thomas)

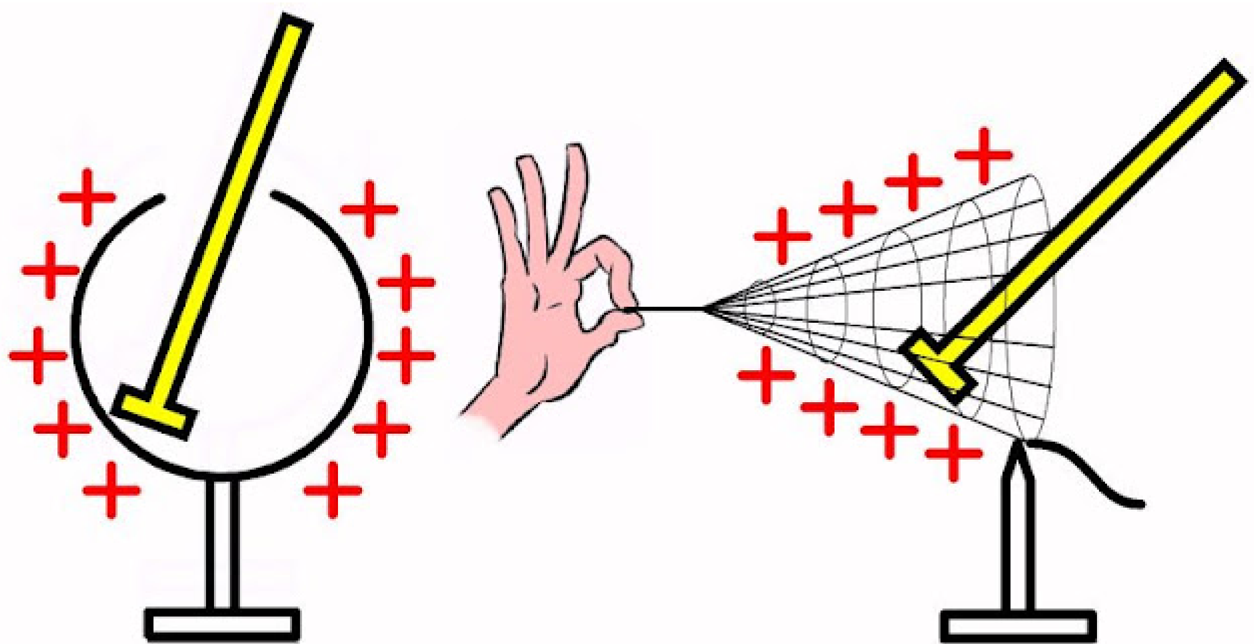
Molen van Hamilton
Een ander experiment waarmee u elektrische wind kan aantonen is de zogenoemde 'molen van Hamilton'. Een rad, bestaande uit gepunte spaken waarvan de uiteinden onder een hoek van 90 graden gebogen zijn, kan vrij draaien op een asje. Zowel de as als het rad moeten van een elektrisch geleidend materiaal zijn gemaakt. Als u de as verbindt met de uitgang van een positief geladen Van de Graaf generator, zult u opmerken dat het rad gaat draaien. Blijkbaar veroorzaken de gepunte uiteinden van de spaken een luchtverplaatsing, waardoor het rad in de tegengestelde richting gaat draaien.



Een 'molen van Hamilton' die vroeger in het natuurkunde practicum werd gebruikt.
(© Thomas B. Greenslade)

Verklaring van de werking van de elektrische wind
Dit vreemde verschijnsel kan verklaard worden door de atoomtheorie. Lucht bevat natuurlijk atomen en hoewel deze atomen isolatoren zijn en dus weinig tot geen vrije elektronen hebben, kunnen sommige elektronen van de buitenste banen toch door de grote aantrekkingskracht van de puntige sterke positieve lading uit het atoom worden gerukt. Er ontstaan dus, in de buurt van de punt, negatief geladen vrije elektronen en positief geladen ionen. De negatieve elektronen worden door de sterk positief geladen punt aangetrokken, de positieve ionen worden er door afgestoten. Nu zijn elektronen heel wat lichter en kleiner dan ionen. De snel bewegende positieve ionen botsen tegen luchtatomen en slepen deze mee in hun bewegingsrichting. De lichte elektronen zullen ook wel tegen atomen botsen, maar deze zijn niet in staat deze veel zwaardere objecten in beweging te zetten. Het gevolg is dus dat er een luchtverplaatsing ontstaat vanuit de ladingspunt, een beweging die verantwoordelijk is voor het uitblazen van de kaarsvlam en voor het in beweging zetten van het rad.

Het ladingsgedrag van holle geleiders
Een volgende vreemdsoortige eigenschap van ladingen is dat zij zich bij voorkeur ophouden in de buitenste oppervlakteschil van geleiders. Ook dit vreemde verschijnsel kan gemakkelijk experimenteel aangetoond worden. In de linker tekening van onderstaande figuur is een holle koperen bol aangebracht op een isolerende ophanging. In de bovenzijde van de bol is een klein gaatje aangebracht, zodat u met een ladingsmeter naar binnen kunt. De holle bol wordt nu opgeladen door middel van ladingsinductie. Als u nadien met de ladingsmeter de bol zowel van binnen als van buiten aftast zult u vaststellen dat alle lading (positief in dit geval) terug te vinden is aan de buitenzijde en u in de binnenkant van de bol absoluut geen lading meet.


Twee experimenten, waarmee u de ladingsverdeling op en in een holle geleider kunt meten.
(© 2017 Jos Verstraten)

Het vlindernet experiment van Faraday
In de rechter tekening is een zeer beroemd experiment getekend, het 'vlindernet experiment van Faraday'. Faraday gebruikte een vlindernetje van katoen, dat voorzien was van een dunne zijden draad. Het net was aan de punt vast verbonden met de zijden draad en aan de andere kant opgehangen aan een isolerende voetplaat. Het net werd door middel van inductie opgeladen. Als men nadien met een ladingsmeter binnen- en buitenzijde van het net aftast, stelt men vast dat alle lading alleen aan de buitenzijde van het net is terug te vinden. Nadien wordt het net binnenste buiten gekeerd door aan de zijden draad te trekken. Verbazingwekkend is dat de ladingsmeter een identieke ladingsverdeling vaststelt! Tijdens het

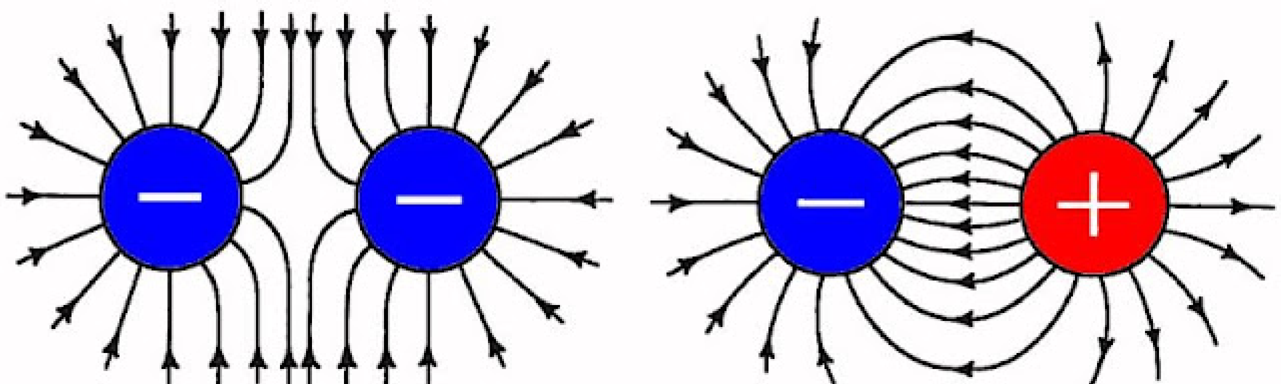
binnenste buiten keren van het net heeft de positieve lading zich dus blijkbaar razendsnel verplaatst van de ene kant van het net naar de andere kant. Deze vreemdsoortige eigenschap van geladen voorwerpen kon alleen worden verklaard toen de wetenschap inzicht kreeg in het rechtstreeks gevolg van elektrische lading, namelijk het elektrisch veld.

Elektrisch veldsterkte

Inleiding
Rond een punt dat een elektrische lading heeft, ontstaat per definitie een elektrisch veld. Dit lijkt in tegenspraak met de unificatie tussen elektrisch, magnetisch en gravitationeel veld. Magnetische velden zijn duidelijk alleen aanwezig tussen een zuid- en een noordpool (het ene bestaat niet zonder het andere) en ook gravitationele velden ontstaan alleen tussen massa's. U zou dus kunnen verwachten dat een elektrisch veld alleen aanwezig is tussen twee verschillend geladen voorwerpen. In feite is dat ook zo. Dit wil echter niet zeggen dat die voorwerpen in elkaars nabijheid moeten liggen. Ook rond één geladen punt kan men een elektrisch veld vaststellen, de tweede lading kan namelijk zonder probleem ergens in het oneindige liggen. Elektrische velden hebben namelijk de eigenschap dat zij zich zonder probleem tot in het oneindige kunnen uitstrekken.

Wat is dit veld?
Ook nu kan de vraag wat zo'n elektrisch veld nu precies is, niet exact beantwoord worden. Een veld is een fundamentele eigenschap van de natuur waar wij, mensen met beperkt voorstellingsvermogen, ons niets bij kunnen voorstellen. Een veld, of het nu een elektrisch veld, magnetisch veld of gravitatieveld is, kan nog het best kan opgevat worden als een deel van de ruimte waarin een bepaalde kracht zich manifesteert. Die kracht wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van lading, magnetische pool of massa. Vandaar dat men stelt dat een elektrisch veld de invloedssfeer in de ruimte is van een elektrische lading. Deze invloed uit zich onder de vorm van een kracht, die wordt uitgeoefend op een tweede elektrische lading die wordt geplaatst binnen de invloedssfeer (dus het veld) van de eerste lading.

De krachtlijnen van een veld
Een veld wordt voorgesteld door rond de lading een aantal denkbeeldige lijnen te tekenen. Het verloop van die lijnen, die men de krachtlijnen noemt, geeft aan in welke richting er op dat bepaalde punt een kracht zou worden uitgeoefend. Faraday komt de eer toe als eerste wetenschapper het idee van de krachtlijnen van een elektrische lading te hebben bedacht. Dank zijn deze imaginaire lijnen kunnen een heleboel eigenschappen van ladingen worden verklaard. Rond een eenzame puntlading verlopen de krachtlijnen volledig cirkelvormig. Brengt u echter twee puntladingen in elkaars nabijheid, dan zult u vaststellen dat de krachtlijnen van beide velden op elkaar reageren door ofwel elkaar te versterken (ongelijkpolige ladingen) ofwel elkaar tegen te werken (gelijkpolige ladingen). Dit is getekend in onderstaande figuur.

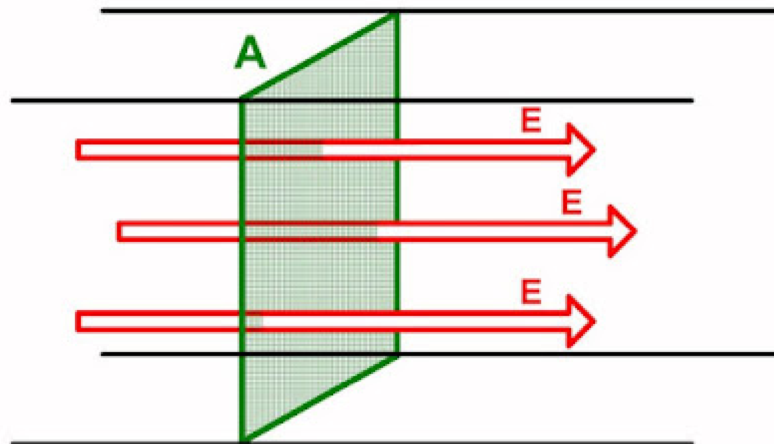


De interactie tussen de krachtlijnen van twee puntladingen die in elkaars elektrisch veld worden geplaatst. (© 2017 Jos Verstraten)

Equivalentie met het magnetisch veld valt op!
De manier van denken van Faraday was natuurlijk niet zo vreemd. Immers, iedereen die een staafmagneetje, een stukje karton en een potje ijzervijlsel in zijn zak heeft zitten is in staat de krachtlijnen van een magnetisch veld zichtbaar te maken. Hoewel het bestaan van elektrische krachtlijnen nooit experimenteel is aangetoond, lag het voor de hand te veronderstellen dat een elektrisch veld zich net zo zou presenteren in de ruimte als een magnetisch veld.

Elektrische veldsterkte
In een elektrisch veld ondergaat een geladen lichaam een kracht F waarvan de grootte recht evenredig is met de grootte van de lading Q. Die evenredigheidsfactor tussen kracht en lading noemt men de elektrische veldsterkte E. In formulevorm kunt u schrijven:
$F = E \cdot Q$
Omdat de kracht wordt uitgedrukt in N en de lading in C, moet de eenheid van elektrische veldsterkte gelijk zijn aan N/C, oftewel newton per coulomb. Denk er aan dat de elektrische veldsterkte een vectoriële grootheid is, die dus niet alleen een absolute grootte, maar ook een richting heeft. Het belang van het begrip veldsterkte is dat u de door Faraday veronderstelde krachtlijnen nu wiskundig kan definiëren. Die krachtlijnen kunnen immers voorgesteld worden door een reeks veldsterkte-vectoren, waarvan de grootte de sterkte van de krachtlijnen definieert en de richting het verloop van de krachtlijnen.

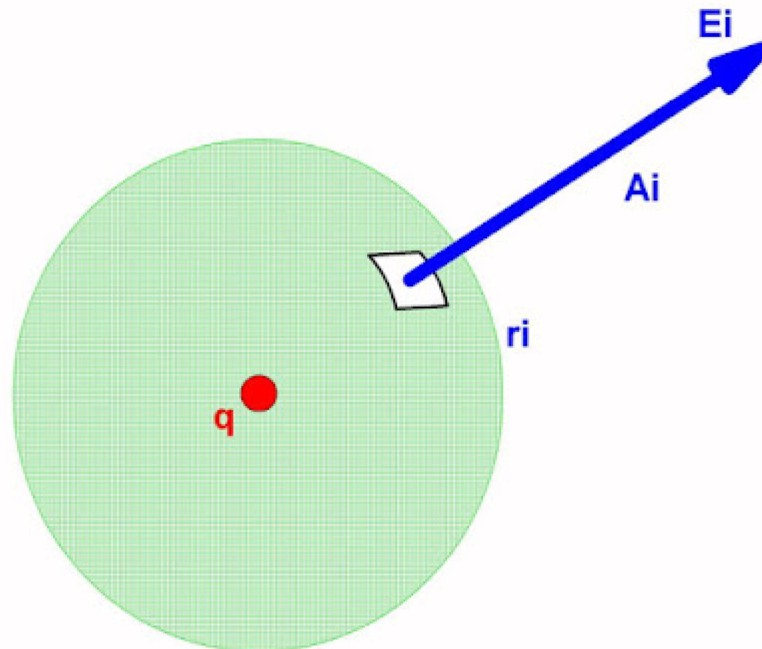
Elektrische flux
Het woordje flux komt uit het Latijn en betekent stroom of stroming. Met behulp van dit begrip kunt u de veldsterkte per oppervlakte definiëren. In onderstaande figuur is een homogeen elektrisch veld getekend, dat wil zeggen dat alle veldsterkte vectoren E evenwijdig lopen en even groot zijn. In dit homogeen elektrisch veld is loodrecht een oppervlak A aangebracht. De elektrische flux ψ, een Griekse letter die als psi wordt uitgesproken, wordt gedefinieerd als het product van het oppervlak A en de elektrische veldsterkte E die op die plaats aanwezig is:
$\psi = E \cdot A$
Dank zij het begrip flux kunt u de ladingsverdeling in een homogeen, maar ook in een niet-homogeen elektrisch veld volledig wiskundig beschrijven.



De definitie van het begrip elektrische flux. (© 2017 Jos Verstraten)

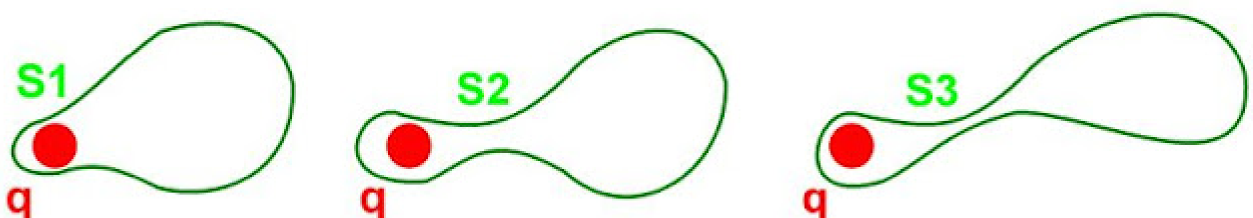
De wet van Gauss
De wet van Gauss, in 1839 opgesteld door de Duitse fysicus Karl Friedrich Gauss, is de belangrijkste wet uit de leer der elektrostatica. Deze leer houdt zich bezig met het beschrijven van de eigenschappen van statische elektrische velden, dus velden die bestaan rond punten met constante ladingen. De wet van Gauss geeft het wiskundig bewijs dat de flux, die door een gesloten oppervlak rond een puntlading ligt, constant is en volledig onafhankelijk van de vorm van het oppervlak. Het is in het kader van dit artikel absoluut onmogelijk om de bewijsvoering van deze stelling te beschrijven. Daarvoor is ingewikkelde wiskunde nodig, onder andere de theorie van de oppervlakte integralen. Ondanks dat, is het toch mogelijk op een eenvoudige manier de belangrijkheid van de wet van Gauss aan te tonen.

Het belang van de wet van Gauss
In onderstaande figuur is het eenvoudigst voorbeeld van een gesloten oppervlak rond een puntlading q getekend: een bol. Een wiskundige zal geen problemen hebben om de flux door het oppervlak van de bol te berekenen. Na vijf minuutjes rekenwerk zal hij/zij er achter komen dat de flux recht evenredig is met de grootte van de lading q, maar onafhankelijk van de waarde van de straal r van de bol. Als u zich dus een grotere bol rond de puntlading voorstelt, dan zal dat geen invloed hebben op de waarde van de flux die door dit boloppervlak gaat!



De elektrische flux die door het oppervlak van een bol rond een puntlading q gaat, is alleen afhankelijk van de grootte van de lading. (© 2017 Jos Verstraten)

Het is de verdienste van Gauss dat hij wiskundig sluitend heeft aangetoond, dat deze stelling ook opgaat als de puntlading zich niet in het middelpunt van de bol bevindt. Bovendien kunt u het boloppervlak vervangen door gelijk welk ander oppervlak. In onderstaande figuur zijn drie gesloten oppervlakken S_1, S_2 en S_3 voorgesteld, die een bepaalde lading q volledig omsluiten. Volgens de wet van Gauss zal de elektrische flux die u in de oppervlakken kunt meten, in alle drie de gevallen gelijk zijn en alleen afhankelijk van de grootte van de lading. Het zal duidelijk zijn dat deze wet heel belangrijk is, omdat u op deze manier het berekenen van elektrische fluxen door oppervlakken sterk kunt vereenvoudigen.
De wet van Gauss kan wiskundig als volgt worden geformuleerd:
$\psi = q_{inwendig} / \varepsilon_0$
Ook ε is een griekse letter, die als epsilon wordt uitgesproken. Deze constante factor geeft de verhouding tussen de flux en de lading.



Uit de wet van Gauss volgt dat de elektrische fluxen door de oppervlakken S1, S2 en S3 identiek zijn. (© 2017 Jos Verstraten)

Ladingsgedrag van holle geleiders verklaard
Dank zij de wet van Gauss kunt u aantonen dat de lading steeds alleen aanwezig is aan de buitenzijde van holle geleiders (zie hoger). Geleiders worden gekenmerkt door de aanwezigheid van vrije elektronen en ionen, die reageren op krachten. Als een hol voorwerp opgeladen blijft, dan kan dit alleen betekenen dat er in het voorwerp geen krachten en dus

geen veldsterkten aanwezig zijn. Zou dit namelijk wél het geval zijn, dan zouden die krachten inwerken op vrije elektronen of ionen en zou het elektrostatisch evenwicht onmiddellijk hersteld worden. Met andere woorden, het voorwerp zou ontladen. Maar als de veldsterkte E nul is, dan betekent dit dat ook de flux nul is. Uit de wet van Gauss volgt dan onmiddellijk dat ook de lading q binnen de geleider nul moet zijn.